

Бодак М.В.

*Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна***АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ЗБІЛЬШЕННЯ НАПРУГИ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ДО 800 В**

У представленому дослідженні проведено ретельний аналіз стратегічного переходу автомобільної індустрії від традиційних 400-вольтових систем тягових акумуляторів до передових високовольтних архітектур рівня 800 В та вище. Актуальність роботи зумовлена глобальними викликами декарбонізації транспортного сектору та необхідністю пришвидшення перезарядки тягових батарей електромобілів шляхом скорочення часу заряджання. Детально розглянуто фізичні ліміти існуючих систем, де основним бар'єром виступають значні резистивні втрати, що призводять до надлишкового тепловиділення та вимагають використання масивних кабельних систем. Встановлено, що архітектура 400 В, попри свою економічну доцільність та розвинену базу сумісної інфраструктури, вичерпала потенціал для впровадження ультрашвидких зарядних протоколів, що робить перехід на підвищену робочу напругу технічно безальтернативним етапом еволюції сучасного електричного транспорту.

Досліджено, як подвоєння напруги дозволяє зменшити силу струму вдвічі при збереженні ідентичної потужності, що не лише мінімізує термічне навантаження на акумуляторні осередки, а й дозволяє знизити масу провідникових матеріалів на 20–30%.

Частина дослідження присвячена аналізу сумісності високовольтних транспортних засобів із наявною інфраструктурою та прогнозуванню подальшого розвитку галузі в напрямку систем 1200 В. Обґрунтовано, що інтеграція 800-вольтових систем у масовий сегмент електромобілів, попри вищу початкову собівартість SiC-компонентів, забезпечує значне підвищення загальної енергоефективності та конкурентоспроможності. Висновки роботи вказують на те, що майбутні проекти, створюють фундамент для остаточного витіснення автомобілів із ДВЗ завдяки досягненню паритету у швидкості заправки та енергетичній автономності.

Ключові слова: електромобіль, акумуляторна батарея, швидка зарядка, високовольтні архітектури, потужність, надійність.

ВСТУП

Стрімке зростання глобального ринку електромобілів (EV) як інструменту декарбонізації транспортного сектору супроводжується підвищеними вимогами споживачів до запасу ходу та швидкості заряджання батареї. Традиційні 400 В архітектури силових батарей на сьогодні досягли свого фізичного максимуму. Головною перешкодою для подальшого підвищення потужності заряджання в таких системах є необхідність пропорційного збільшення сили струму, що призводить до зростання теплових втрат, перегріву акумуляторних модулів та потреби у надмірно важких і дорогих кабельних системах. Незважаючи на очевидні переваги переходу до архітектур підвищеної напруги (800 В та вище), цей процес створює низку технічних та економічних викликів. По-перше, виникає гостра потреба у повній заміні кремнієвих напівпровідників на дорожчі компоненти з широкою забороненою зоною (SiC/GaN). По-друге, існуюча глобальна зарядна інфраструктура здебільшого не розрахована на рівні напруги понад 500 В, що потребує складних бортових систем перетворення енергії. По-третє, робота при високій напрузі висуває нові вимоги до електробезпеки та гальванічної ізоляції згідно з директивами ЄС.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю систематизації технічних рішень, що дозволяють збалансувати ефективність, вартість та швидкість заряджання електромобілів наступного покоління. Вирішення проблеми сумісності та оптимізації високовольтних систем є критично важливим для подальшої модернізації електромобілів та зменшення часу заряджання електромобілів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання оптимізації архітектури тягових батарей є об'єктом уваги провідних інженерних та наукових центрів. Дослідження [1] підкреслюють, що величина напруги є ключовим детермінантом продуктивності електромобілів, та відповідає глобальними цілями декарбонізації.

Особлива увага в роботах [2], [3] приділяється переходу від 400 В до 800 В вказують, що цей перехід став можливим завдяки прогресу в напівпровідниковій індустрії. Зокрема, використання компонентів на базі карбіду кремнію (SiC) дозволяє мінімізувати втрати на перемикання.

Енергоефективність високовольтних систем досліджувалася в роботі [4]. Автори математично довели зниження резистивних втрат при зменшенні сили струму. Питання термоменеджменту та довговічності батарей при надшвидкій зарядці висвітлені в роботі [5]. Автор акцентує увагу на тому, що архітектура 800 В дозволяє уникнути критичного перегріву осередків, що є головною проблемою 400-вольтових систем.

Проблематика зарядної інфраструктури та її готовності до стандартів 800 В і майбутніх 1200 В розглядається в публікації [6], а також у звітах Європейської Комісії [7], де встановлено регуляторні межі для обладнання.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є проведення комплексного порівняльного аналізу архітектур тягових акумуляторних батарей із напругою 400 В та 800 В та визначення їхньої ефективності в умовах сучасного ринку електромобілів.

Завданнями дослідження є аналіз переваг та технологічних викликів що створюють 800 В архітектури електромобілів, аналіз сумісності електромобілів з 800 В архітектурою та зарядних станцій з напругою 400 В, аналіз імплементації даної технології в сучасних електромобілях.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Напруга акумулятора має безпосередній вплив на ефективність усієї енергосистеми електромобіля. Вищі рівні напруги дозволяють використовувати нижчий струм для досягнення заданої вихідної потужності.

Крім того, компоненти силової електроніки, такі як інвертори та перетворювачі, є ефективнішими при роботі з підвищеною напругою. Вони здатні працювати з меншими значеннями сили струму, що мінімізує втрати на перемикання [8]. Збільшення напруги акумулятора також дозволяє значно зменшити розмір і вагу електричних компонентів. Площа поперечного перерізу силових кабелів може бути мінімізована, що призводить до суттєвої економії ваги та коштів, особливо у системах заряджання високої потужності [4].

Акумуляторний блок на 400 В зазвичай складається з великої кількості літій-іонних елементів (комірок), з'єднаних послідовно (орієнтовно 96-108 штук). Кожен із цих елементів має номінальну робочу напругу близько 3,7 В.

Переваги 400 В архітектури:

- відсутність потреби у спеціалізованих високовольтних компонентах значно знижує витрати на виробництво та подальше технічне обслуговування;
- більшість сучасних громадських і житлових зарядних станцій підтримують системи 400 В, що гарантує легкість розгортання та експлуатації;
- розроблені для мінімальних втрат енергії, системи 400 В добре інтегруються з усталеними структурами управління енергією;
- робота при нижчих рівнях напруги генерує менше тепла в штатних режимах, що дещо спрощує контроль температури порівняно з екстремальними високовольтними рішеннями.

Основним недоліком систем 400 В є відносно повільніша швидкість заряджання порівняно з архітектурами вищої напруги. Оскільки потужність визначається добутком напруги на силу струму, вихідна потужність за своєю природою обмежена максимальним струмом. Збільшення напруги системи дозволяє знизити струми, які інакше були б обмежені термічними нормами та вимогами безпеки.

Хоча ємність акумулятора є головним фактором запасу ходу електромобіля, системна напруга впливає на те, наскільки ефективно енергія доставляється до двигуна. Високе постачання енергії в системах 400 В передбачає високе споживання струму, що призводить до збільшення розсіювання енергії та посилює вимоги до ефективного керування температурним режимом. Такі втрати та обмеження потужності помітні у електричних вантажівках, масивних позашляховиках.

800-вольтна архітектура акумуляторів ознаменувала значний прогрес у технології електромобілів, забезпечуючи вищу енергоефективність, швидше заряджання та оптимізовану передачу потужності. Ця архітектура вже реалізована у високопродуктивних електромобілях, таких як Porsche Taycan та Hyundai Ioniq 5, демонструючи свій потенціал для збільшення запасу ходу транспортних засобів та скорочення часу заряджання.

Системи 800 В використовують конфігурацію акумуляторної батареї з приблизно 200 елементами, з'єднаними послідовно, кожен з яких працює при номінальній напрузі 3,7 В. Подвоєння напруги відносно систем 400 В дозволяє знизити силу струму. Ці переваги дещо нівелюються тим, що системи 800 В вимагають спеціалізованої силової електроніки. Зокрема, йдеться про використання напівпровідників із карбіду кремнію (SiC) замість традиційного кремнію (Si) в інверторах. SiC-компоненти ефективніше працюють при високій напрузі, менше нагріваються, але суттєво збільшують вартість інвестицій у виробництво. Крім того, виробники повинні дотримуватися регуляторних стандартів, включаючи електробезпеку та відповідність електромережам згідно з директивами ЄС [9].

Однією з найважливіших переваг систем 800 В є здатність досягати значно вищих швидкостей заряджання. У системі 400 В забезпечення високої потужності вимагає більших провідників та більш надійного охолодження через вищу силу струму. Натомість система 800 В може видавати таку саму потужність із вдвічі меншим струмом. Це дозволяє використовувати тонші кабелі, покращує теплову ефективність і робить архітектуру 800 В ідеальною для ультрашвидких зарядних станцій, що видають 250 кВт і більше. Як результат, багато високопродуктивних електромобілів переходять на платформи 800 В, щоб виправдати очікування споживачів щодо скорочення часу простою при заряджанні електромобіля.

Терморегуляція є ключовим фактором в електромобілях, особливо в міру зростання рівнів напруги акумуляторів. Хоча системи вищої напруги зменшують резистивні втрати, вони також вимагають оптимізованих методів відведення тепла для підтримки експлуатаційної ефективності. Високовольтне заряджання (особливо при потужностях 250-350 кВт) впроваджує нові виклики в управлінні температурою, оскільки надзвичайно швидка передача енергії може призвести до ефектів локалізованого нагрівання всередині батарейного блоку. Ефективні стратегії охолодження, такі як інтегровані системи рідинного охолодження та використання матеріалів із фазовим переходом. Здатність підтримувати нижчі робочі температури знижує навантаження на матеріали акумулятора, пом'якшуючи деградацію ємності з плином часу [4].

Автомобіль використовує власний бортовий зарядний пристрій (On-Board Charger, OBC) для перетворення змінного струму (AC) з мережі на постійний струм (DC) для зберігання в батареї. Зарядка рівень 1 (Level 1) використовує стандартну побутову розетку (120 В у Північній Америці та 230 В у Європі). Через низьку потужність (1.5-2.2 кВт) процес займає від 10 до 40 годин. Це ідеально підходить для плагін-гібридів (PHEV) або нічного заряджання. Зарядка рівень 2 (Level 2) працює при вищій нарузі (від 230 В або 380 В). Потужність варіюється від 3.3 кВт до 22 кВт. Завдяки цьому EV може отримати повний заряд максимум за 4-8 годин. Це оптимальний вибір для щоденного використання та робочих місць.

При швидкому заряджанні постійним струмом (DC Fast Charging / Level 3) оминається бортовий зарядний пристрій і подача постійного струму (DC) відбувається безпосередньо в батарею, що кардинально скорочує час процесу. Стандартна швидка зарядка (400–500 В) має потужність від 50 кВт до 150 кВт. Забезпечує заряджання до 80% за 30–80 хвилин. До основних світових стандартів належать CCS (Combined Charging System), GBT та мережа Tesla Supercharger.

Ультрашвидкісна зарядка (800 В та вище) розвивалась паралельно з створенням 800-вольтних батарей. Така зарядка здатна видавати потужність від 250 кВт і вище. Автомобілі (як-от Porsche Taycan) можуть поповнити заряд до 80% за 10–20 хвилин. Такі системи генерують менше тепла в кабелях станції через знижену силу струму.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На сьогодні існує низка відомих моделей електромобілів, які успішно використовують системи 800 В, це Audi e-tron GT, Porsche Taycan, Lucid Air (номінальна напруга ≈ 924 В), Chevy Silverado EV та сучасні моделі Hyundai/Kia. Високовольтна архітектура дозволяє цим автомобілям підтримувати швидке заряджання DC на рівнях до ≈ 300 – 350 кВт.

Крім цього, компанія Ford також подала патенти на свої багаторівневі архітектури (до 1200 В). Хоча деякі прототипи суперкарів уже досліджували гібридні системи на 1200 В, їхнє широке комерційне використання і впровадження наразі виглядає перспективою віддаленого майбутнього.

ВИСНОВКИ

Швидкість заряджання становить головну відмінність між системами 400 В та 800 В. Хоча традиційні 400-вольтні системи широко застосовуються, вони використовують вищі сили струму, що генерує надлишкове тепло та знижує загальну ефективність. Заряджання до 80% для таких систем займає 30–60 хвилин. Натомість системи 800 В досягають аналогічного заряду всього за 10–20 хвилин завдяки зменшенню сили струму та втрат тепла, навіть при вищих рівнях потужності (250 кВт та вище).

Це робить архітектуру 800 В (та потенційно 1200 В) ідеальним рішенням для швидких подорожей на далекі відстані, кардинально покращуючи енергетичну ефективність транспорту та наближаючи час зарядки електромобіля до швидкості заправки автомобілів із двигунами внутрішнього згорання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.Zhang L., Hu X. Efficiency analysis and optimization of 800V high-voltage battery systems for electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2021. Vol. 482. 229501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229501>.
- 2.Manthiram A. A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. *Nature Energy*. 2020. Vol. 5, no. 7. P. 506–517. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0557-0>.
- 3.Berckmans G. et al. Cost and performance analysis of 800 V vs. 400 V electric vehicle drivetrains. *World Electric Vehicle Journal*. 2020. Vol. 11, no. 1. 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj11010009>.
- 4.Zhang J., Wu G., Du J. Optimal energy management strategy for PHEVs with multi-voltage electrical systems. *Applied Energy*. 2019. Vol. 242. P. 883–895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.155>.
- 5.Yang X. G. et al. Asymmetric temperature modulation for extreme fast charging of lithium-ion batteries. *Nature*. 2019. Vol. 575, no. 7781. P. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1685-z>.
- 6.Das H. S. et al. Electric vehicles in the smart grid: A review of vehicle-to-grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 125. 109813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109813>.
- 7.Directive 2014/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage limits. *Official Journal of the European Union*. 2014. L 96. P. 357–374.
- 8.Zhang H., Ge B., Liu Y. Impact of SiC devices on the energy efficiency of electric vehicle drivetrains. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021. Vol. 68, no. 11. P. 10556–10567. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3031541>.
- 9.Chen D. et al. A review of lithium-ion battery thermal management system with vapor compression refrigeration for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 145. 111039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111039>.

REFERENCES

- 1.Zhang, L., & Hu, X. (2021). Efficiency analysis and optimization of 800V high-voltage battery systems for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 482, 229501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229501>.
- 2.Manthiram, A. (2020). A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. *Nature Energy*, 5(7), 506–517. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0557-0>
- 3.Berckmans, G., De Sloovere, B., Devriese, W., Schier, M., Smekens, J., Hegazy, O., & Van Mierlo, J. (2020). Cost and performance analysis of 800 V vs. 400 V electric vehicle drivetrains. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 9. <https://doi.org/10.3390/wevj11010009>
- 4.Zhang, J., Wu, G., & Du, J. (2019). Optimal energy management strategy for PHEVs with multi-voltage electrical systems. *Applied Energy*, 242, 883–895. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.155>
- 5.Yang X. G. et al. Asymmetric temperature modulation for extreme fast charging of lithium-ion batteries. *Nature*. 2019. Vol. 575, no. 7781. P. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1685-z>.
- 6.Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S., & Tan, C. W. (2020). Electric vehicles in the smart grid: A review of vehicle-to-grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109813>
- 7.European Commission. (2014). Directive 2014/35/EU on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage limits. *Official Journal of the European Union*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/35/oj>
- 8.Zhang, H., Ge, B., & Liu, Y. (2021). Impact of SiC devices on the energy efficiency of electric vehicle drivetrains. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(11), 10556–10567. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3031541>
- 9.Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Wang, A. (2021). A review of lithium-ion battery thermal management system with vapor compression refrigeration for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111039>

M. Bodak. Analysis of the benefits of increasing the battery voltage of electric vehicles to 800 V

The presented study analyzes the strategic transition of the automotive industry from traditional 400-volt traction battery systems to advanced high-voltage architectures of 800 V and above. The relevance of

the work is due to the global challenges of decarbonization of the transport sector and the need to reduce charging times. The author examines in detail the physical limits of existing systems, where the main barrier is significant resistive losses (I^2R), which lead to excess heat generation and require the use of massive cable systems. It is established that the 400 V architecture, despite its economic feasibility and developed base of compatible infrastructure, has exhausted the potential for the implementation of ultra-fast charging protocols, which makes the transition to an increased operating voltage a technically unalternative stage in the evolution of modern electric transport.

The work places special emphasis on the technological transformation of the component base, in particular, on the transition from silicon semiconductors (Si IGBT) to wide-gap components based on silicon carbide (SiC). It is investigated how doubling the voltage allows to reduce the current strength by half while maintaining identical power, which not only minimizes the thermal load on the battery cells, but also allows to reduce the mass of conductive materials by 20–30%. Special attention is paid to innovative thermal management methods, including integrated liquid and immersion cooling systems, which ensure the stability of electrochemical processes and significantly slow down the degradation of battery capacity under conditions of ultra-high loads.

The final part of the study is devoted to the analysis of the compatibility of high-voltage vehicles with the existing infrastructure and the forecasting of the further development of the industry towards 1200 V systems. It is substantiated that the integration of 800 V systems into the mass segment of electric vehicles, despite the higher initial cost of SiC components, provides a significant increase in overall energy efficiency and competitiveness. The conclusions of the work indicate that future projects, such as the European ENLIGHTEN initiative, create the foundation for the final replacement of ICE cars by achieving parity in refueling speed and energy autonomy.

Key words: electric vehicle, battery, fast charging, high-voltage architectures, power, reliability.

БОДАК Максим Володимирович – викладач кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>, email: bodak@lutsk-ntu.com.ua,

Maksym BODAK – Lecturer, Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>, email: bodak@lutsk-ntu.com.ua,

Дата надходження статті до видання: 04.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

<https://doi.org/10.36910/0bpth191>